



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## VÝVOJ PROSTŘEDKŮ ŘÍZENÍ LETOUNU

DEVELOPMENT OF THE AIRCRAFT CONTROL DEVICES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Stanislav

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Daněk, CSc.

BRNO 2017



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Filip Stanislav**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Daněk, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Vývoj prostředků řízení letounu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce se zabývá vývojem principů řízení klasických i nekonvenčních letadel od počátků letectví. Řízení letounu spočívá v ovládnutí jen 3 rotačních stupňů volnosti. I když tento princip přetrvává, konkrétní provedení orgánů řízení je již mnohem sofistikovanější.

Předmětem práce je rešeršní formou zpracovat přehled vývoje až po současný stav řízení letadel.

### Cíle bakalářské práce:

- Stručně a přehledně zpracovat používané principy řízení letadel
- Popsat funkce klasických i nekonvenčních orgánů řízení, včetně koncepčního provedení
- Řídicí síly na řídicích v pilotní kabině
- Způsoby ovlivňování a vyvažování řídicích sil

### Seznam literatury:

DANĚK,V. Mechanika letu-II: Letové vlastnosti. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 334 s. ISBN 978-80-7204-761-1.

Časopisecké články Letectví a kosmonautika, ISSN 0024-1156.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakult

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce zpracovává rešeršní formou vývoj prostředků řízení letounu od konce 18. století do dnešní doby. Princip řízení letounu pomocí tří rotačních stupňů volnosti je znám od začátku 20. století, avšak jeho objevení předcházely pokusy leteckých nadšenců více než století dříve. Ovládání letounu třemi rotacemi použili poprvé bratři Wrightové a přetrvává dodnes. Konkrétní konstrukční provedení orgánů řízení je dnes voleno s ohledem na aerodynamické vlastnosti s požadavkem minimální hmotnosti a dostatečné pevnosti pro konkrétní účel letounu.

Stále větší řídící síly na řídidlech v pilotní kabině vlivem náročnějších požadavků na ovladatelnost a rychlost letu neumožňují pohodlné a nenáročné řízení. Z tohoto důvodu je třeba je ovlivňovat. V textu jsou popsány možnosti vyvážení a zmenšení těchto sil a problematika zpětné vazby zatížení kormidel letounu směrem k pilotovi.

Práce poskytuje ucelený přehled vývoje principů orgánů řízení a čtenáře seznamuje s klasickými i nekonvenčními prostředky řízení letounu.

## **Klíčová slova**

Prostředek řízení, kormidlo, letoun, řiditelnost, řídící síla



## **Abstract**

This bachelor thesis handles by literature research the development of airplane control devices since end of the 18th century. The principle of airplane control using three rotational degrees of freedom is known since beginning of 20th century, but there were many attempts to find this principle more than hundred years ago. The three axis control system was used for the first time by Wright brothers and has been used since then. The particular design of the airplane control surfaces is nowadays selected with regard to aerodynamical properties with requirements of minimum weight and adequate strength.

An increasing control forces on control stick and pedals in airplane cockpit due to demanding requirements to maneuverability and speed of flight do not allow pilot comfortable and easy driving. Therefore it is necessary to influence this forces. In the text there are described possibilities of influencing them such as problems of feedback from control surfaces to pilot.

This thesis gives a comprehensive overview of development of airplane control principles and gives the summary of classical and unconventional airplane control devices.

## **Key words**

Control device, control surface, airplane, control, control force





## **Bibliografická citace**

STANISLAV, F. *Vývoj prostředků řízení letounu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Daněk, CSc..



## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité prameny a literaturu.

V Brně, dne

Filip Stanislav



## **Poděkování**

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Daňkovi, CSc., který mi nabídl zpracování tématu, jež mi pomohlo lépe se připravit k budoucímu studiu v oblasti letectví a pomocí něhož jsem získal ucelenou představu o historickém vývoji letectví u nás i ve světě a o problematice letu a konstrukce letadel.

Děkuji také mým rodičům Alici a Petrovi, sestře Dominice a přítelkyni Zorce, kteří mi byli nápomocni a u kterých jsem našel útočiště po celou dobu svého bakalářského studia.



# OBSAH

1	ÚVOD .....	16
2	ZÁKLADNÍ POJMY .....	17
3	ŘÍZENÍ LETOUNU.....	18
4	HISTORICKÝ VÝVOJ ŘÍZENÍ LETOUNU .....	20
4.1	Před bratry Wrightovými.....	20
4.2	Přínos bratři Wrightových .....	26
4.3	Vývoj po roce 1903 .....	28
4.4	Řídicí síly .....	29
5	SOUČASNÉ PROSTŘEDKY ŘÍZENÍ LETOUNU .....	30
5.1	Klasické prostředky řízení letounu .....	30
5.1.1	Výškové kormidlo .....	30
5.1.2	Směrové kormidlo .....	31
5.1.3	Křídélka .....	33
5.2	Nekonvenční prostředky řízení letounu .....	34
5.2.1	Přídové plochy .....	34
5.2.2	Vektorování tahu .....	34
5.2.3	Diferenciace tahu u vícemotorových letounů .....	35
5.2.4	Změna centráže .....	35
6	OVLIVŇOVÁNÍ ŘÍDICÍCH SIL .....	36
6.1	Aerodynamické pasivní osově odlehčení .....	36
6.2	Vyvažovací ploška (trimer) .....	37
6.3	Odlehčovací ploška (fletner) a přítěžovací ploška .....	37
6.4	Pružina a závaží v řídicí soustavě.....	37
6.5	Posilovače řízení .....	38
6.6	Nepřímá soustava řízení.....	38
7	ZÁVĚR .....	39
	POUŽITÉ ZKRATKY.....	40
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	40

# 1 ÚVOD

Tato práce popisuje historický vývoj principů řízení letounů od konce 18. století, kdy se začíná formovat vývoj a první letouny jako takové. V této době už lidstvo zná první letadla – balony a vzducholodě, které jsou ve velké míře používány. I přes jejich velkou nevýhodu velmi obtížného řízení letu jim člověk důvěřuje více než letounům a kluzákům těžším než vzduch jejichž vývoj je proto velmi pozvolný. Postupem času se však ukáže, že letouny nabízí větší možnosti letu a princip jejich letu a řízení je brzy osvojen.

Přelomem v řízení letounu je let bratří Wrightových s jejich letounem Wright Flyer v roce 1903, který byl významný nejen díky svému prvenství, ale především proto, že byl celou dobu úspěšně řízen. Průkopníky se Orville a Wilbur stali především díky tomu, že při sestrojování létajícího stroje kladli velký důraz (oproti většině tehdejších vynálezců) na vyřešení otázky říditelnosti. Důležitost řízení nám ukazuje také fakt, že předmětem jejich prvního patentu nebyl létající stroj, nýbrž systém aerodynamického řízení pomocí manipulace s povrchy letadla. Tento systém řízení je jednoduchý a efektivní a jeho princip přetrvává u naprosté většiny letounů dodnes. Lidstvo však muselo urazit dlouhou cestu napříč celým 19. stoletím, než ovládlo chování letounu ve vzduchu.

Následující text je rozdělen do dvou hlavních částí.

První z nich definuje letoun jako takový a stručně se věnuje historickému vývoji principů řízení letounu.

Druhá poskytuje přehled současných klasických i nekonvenčních prostředků řízení letounu a jejich princip funkce. Dále je rozebrána problematika řídicích sil na řídidlech v kokpitu letounu, jejich dopad na řízení a možnosti jejich ovlivnění.



## **2 ZÁKLADNÍ POJMY**

Autor práce níže uvádí základní pojmy, které jsou v ní obsaženy a jsou nezbytné pro pochopení její problematiky.

### **Letadlo**

Podle předpisu L2 je letadlo definováno takto: Zařízení schopné odvozovat sílu nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakcemi vůči zemskému povrchu. Předpis L2 je jeden z předpisů řady L, které upravují podmínky týkající se letectví v České republice. Jsou uveřejňovány Ministerstvem dopravy České republiky prostřednictvím Letecké informační služby státního podniku Řízení letového provozu ČR. [1]

### **Letoun**

Podle předpisu L2 je letoun letadlo těžší než vzduch s pohonem, vyvolující vztlak za letu hlavně z aerodynamických sil na plochách, které za daných podmínek letu zůstávají vůči letadlu nepohyblivé. Předmětem této práce jsou prostředky řízení letounu. [1]

### **Ovladatelnost**

Schopnost letounu vyvolat takové aerodynamické síly na orgánech řízení, které mu umožní přejít z jednoho ustáleného režimu letu do druhého vlivem vůle pilota. Tyto síly jsou důsledkem výchylek orgánů řízení, které pilot ovládá prostřednictvím řídicích v pilotní kabině. Ty jsou součástí řídicí soustavy.

### **Vyvažitelnost**

Schopnost zcela eliminovat trvale obtěžující řídicí síly na řídicích v pilotní kabině, kterými pilot ovládá kormidla. Příčina vzniku řídicích sil a jejich problematika jsou popsány v textu práce.

### **Orgán řízení**

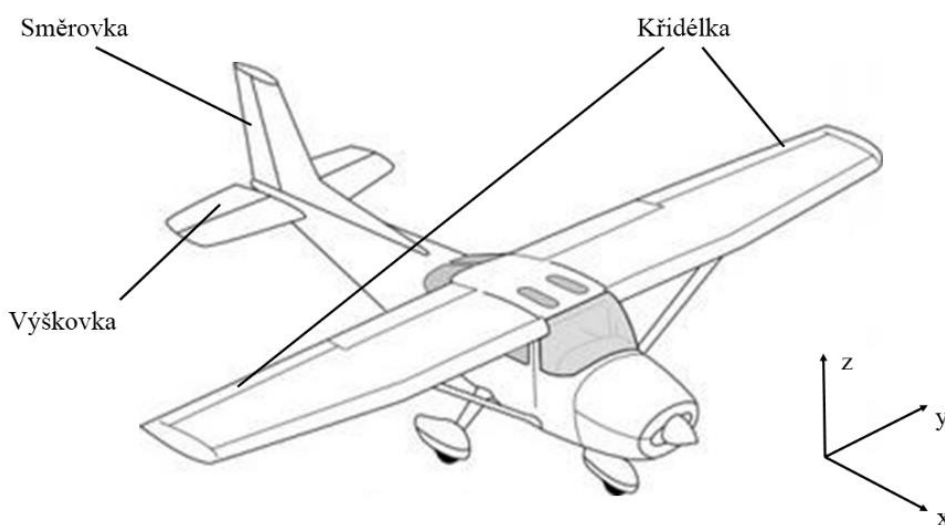
Pohyblivá plocha letounu určená k řízení letounu za letu. Patří sem výškovka, směrovka a křídélka.

### 3 ŘÍZENÍ LETOUNU

Aby bylo použití letadla účelné a praktické, je třeba jej řídit. Prostřednictvím řídicí soustavy řídíme pohyb a chování letounu ve vzduchu i na zemi, do této soustavy můžeme zařadit řízení letounu při pojíždění, jeho letu ve vzduchu, řízení tahu motoru apod. Tato práce pojednává o prostředcích řízení letu letounu (pro zjednodušení dále jako „řízení letounu“) a to konkrétně o ovládání prostřednictvím vychylování kormidel.

Letoun řídíme prostřednictvím pohyblivých řídicích ploch (orgánů řízení) umístěných na jeho částech. Mezi tyto orgány řadíme výškovku, směrovku a křídélka. V kapitole 5 uvedeme i jiné možnosti řízení.

Letoun má za letu šest stupňů volnosti (tři translační a tři rotační). Prostřednictvím orgánů řízení ovládáme pouze rotační pohyby, přičemž zbylé translace jsou řízeny zprostředkovaně.



Obrázek 3-1 Umístění kormidel na letounu - klasické provedení. [16]

#### Klonění

Klonění je rotace kolem podélné osy (osa x, viz obrázek 3-1), které dosáhneme prostřednictvím křidélek. Ta jsou umístěna na odtokové hraně konců křídel. Vychýlením levého křídélka vzhůru a pravého dolů ovlivníme aerodynamické síly na křídlech díky upravené geometrii profilu křídla. Nyní působí na levé křídlo menší vztlak než na pravé a vzniklá nerovnováha působí na letoun klonivým momentem. Letoun se nakloní po směru chodu hodinových ručiček při pohledu zepředu. Při opačné výchylce křidélek změni rotace svůj smysl. Jak bude uvedeno dále, klonění je do značné míry ovlivněno zatáčením a naopak.

#### Klopení

Klopením uvažujeme rotaci kolem příčné osy (osa y) vlivem účinků výškovky. Výškovka je umístěna na zádi letounu zavěšená na horizontální ocasní stabilizační ploše, což je nehybná část vodorovné ocasní plochy zajišťující podélnou stabilitu. Toto je klasické uspořádání. Jak se dozvíme později, výškovka může být umístěna i na přídi letounu. Vychýlením výškovky vzhůru dojde k poklesu vztlaku na VOP (změna geometrie profilu) a moment způsobený nerovnováhou vztlakových sil vůči těžišti letounu způsobí rotaci. Nyní dojde k naklopení nosu letounu vzhůru a ten stoupá.

## **Zatáčení**

Poslední rotací je pohyb okolo svislé osy letounu (osa  $z$ ). Zatáčení je zprostředkováno směrovkou umístěnou (v klasickém uspořádání) na svislém kýlu letounu. Vychýlením směrovky doleva (při pohledu na letoun zezadu) dojde k vyvození aerodynamických sil na tomto svislém kormidle, jejichž výslednice působí doprava. Vzniklý moment k těžišti letounu jej uvede do rotace, nos letounu začne zatáčet doleva. Opačná výchylka směrovky způsobí zatáčení doprava.

## 4 HISTORICKÝ VÝVOJ ŘÍZENÍ LETOUNU

Abychom popsali vývoj řízení letounu od prvopočátků, začneme v patřičném časovém období. Přes velkolepou slávu bratrů Wrightových, jejichž zásluhy však zajisté opomenout nemůžeme, je snadné přehlédnout pokusy leteckých nadšenců, kteří otázku říditelnosti letounu řešili více jak sto let před legendárním severokarolínským letem roku 1903. Jejich snahy o úspěšný let končily přes četné omyly také úspěchy a návrhy jejich strojů nesou první koncepce prostředků řízení již na počátku 19. století.

Následující kapitola je rozdělena do dvou hlavních časových období, mezi nimiž lidstvo zažívá přelom v letecké dopravě jménem bratrů Wrightových. V první části, „předwrightovské“ době, popíšeme ty nejzajímavější konstrukce letadel z hlediska říditelnosti. Vzpomeneme některá významná jména leteckých konstruktérů, kteří práci bratrů Wrightových zajisté ovlivnili, abychom měli lepší přehled nad vývojem řízení. Podrobněji rozebereme význam prvního úspěšného letu letounu, principy jeho řízení a v neposlední řadě analyzujeme „powrightovský“ vývoj prostředků řízení. Vzpomeneme také problematiku řídicích sil a jejich dopad na říditelnost.

### 4.1 Před bratry Wrightovými

Během 18. a 19. století, tedy dlouho před výše zmíněným milníkem, žilo ve světě nemalé množství konstruktérů a nadšenců do aviatiky, kteří se pokoušeli o sestrojení stroje těžšího než vzduch schopného letu. Tehdejší „letouny“ představovaly nedokonalé, plátnem potažené a těžkopádné (některé naopak důmyslné) dřevěné konstrukce, které mnohdy vznikly spojením ohýbaných prutů dřeva. Platilo co kus, to originál. Tehdejší konstruktéři vyvíjeli své stroje v době, kdy problematika letu letounu nebyla předmětem vědní disciplíny a dali tak vzniknout mnoha rozmanitým konstrukcím. Tyto stroje nesly občas chabé známky stabilního a tuhé celku a většina z nich nepřipomínala současné koncepce letounů. Až postupem času začaly nést první známky uspořádání a funkce orgánů řízení jak je známe dnes.

Zmíňme také to, že ještě během 19. století byly stále ve velké oblibě balony a vzducholodě. S tím souvisela nedůvěra ve stroje těžší než vzduch a v důsledku toho jejich velmi pozvolný vývoj. Neznalost aerodynamických profilů křídla a principu vztlaku jak jej známe dnes vedla mnoho konstruktérů ke špatnému směru nalézání cesty do oblak. Naprostá většina z nich hledala klíč ke vzletu letounu inspirací u ptáků, málokterý si ale uvědomil, že cesta mávajících křídel vzhůru do oblak nevede. Na druhou stranu ti, kteří tuto problematiku pochopili (a nebylo jich až tolik málo), se nejednou úspěšně vznesli a částmi jejich strojů byly postupně různorodé prostředky řízení.

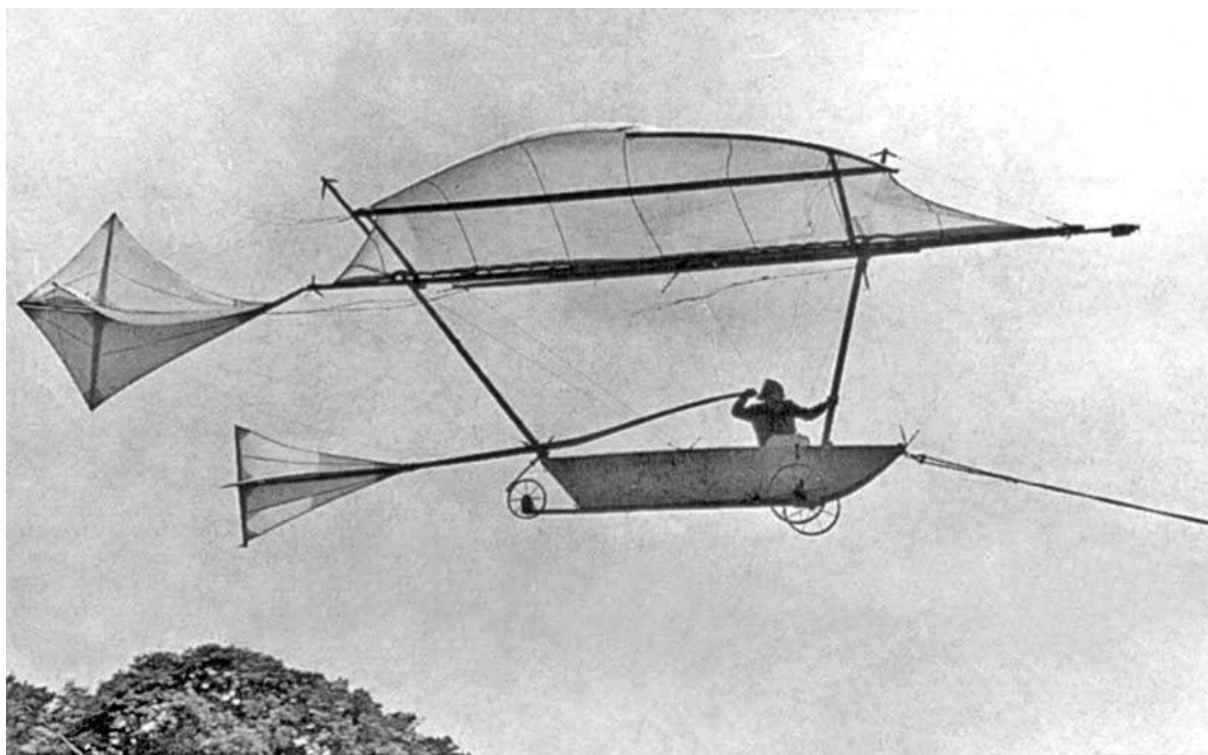
Rozebrat v této práci stroje všech aviatických průkopníků dávné doby je, byť jejich přínos pro problematiku letu nelze opomenout, neúčelné. Vzpomeneme pouze některé stroje leteckých nadšenců, které jsou z hlediska řešení řízení zajímavé a poskytují ucelenou představu o smýšlení nad problematikou letu a jeho říditelnosti v době před bratry Wrightovými.

## Říditelný kluzák Sira Cayleyho

Prvním skutečným leteckým teoretikem, který navrhl říditelný kluzák, byl Angličan Sir George Cayley. Věděl, že pro letoun těžší než vzduch je mj. životně důležitý účinný řídicí systém. V roce 1804 úspěšně odzkoušel model kluzáku, který stabilizoval pomocí nastavitelných ocasních ploch. Tento stroj se odlišoval od dosavadních koncepcí a poprvé zde vidíme vztlak řešený nezávisle na tahu.

Cayley byl světlou výjimkou mezi tehdejšími aviatickými nadšenci, kteří se marně pokoušeli dostat člověka do vzduchu ve stroji těžším než vzduch. Svých úspěchů dosáhl především díky vědeckému přístupu k problematice letu oproti ostatním, kteří stále zkoušeli koncepce mávaných křídel. Své poznatky o zakřivených profilech křídel, které našel ve studiu ptáků, publikoval a probudil tak nadšení u dalších konstruktérů, kteří touze po letu podlehl. Cayley byl první, kdo vyřešil let klasickým způsobem a mohl se tak věnovat dalším problematikám letu, mezi které patří i jeho řízení.

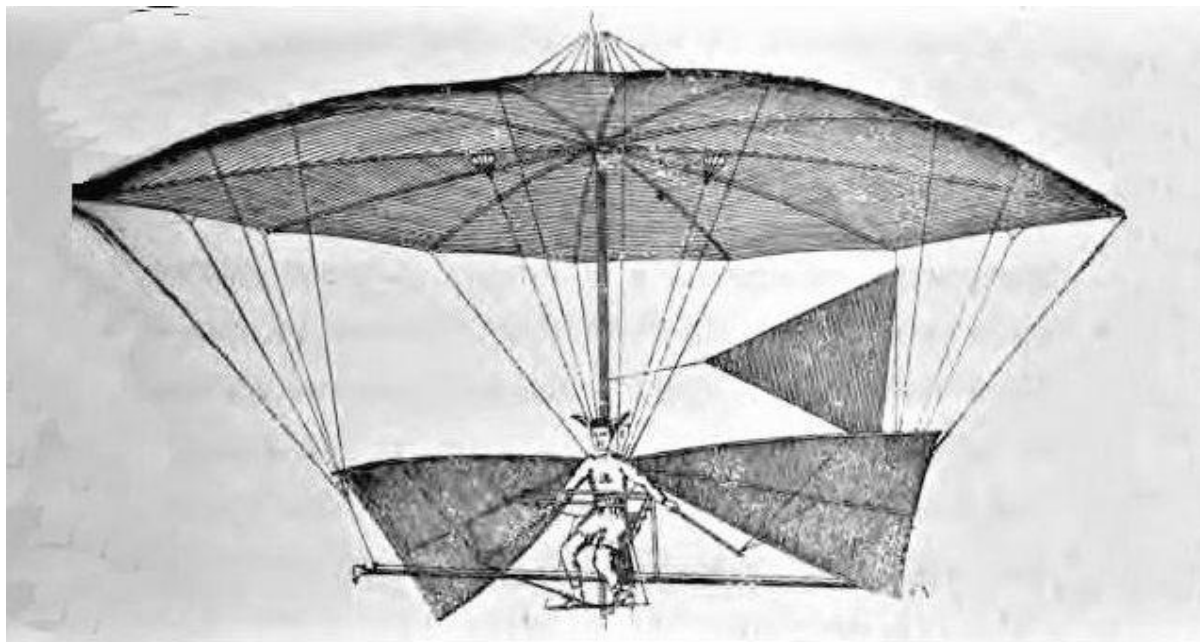
Během první poloviny 19. století svůj kluzák zdokonaloval a roku 1853 (krátce před svou smrtí) dovedl tento koncept do stádia, kdy poprvé vzlétl s dospělým člověkem na palubě. Tah zde zajišťoval nejčastěji kůň, který kluzák táhl, vztlaku pak stroj dosáhl díky zakřivenému profilu křídel, který Cayley sám navrhl. Řízení kluzáku měl tento nadšenec dosáhnout pomocí vodorovných a svislých kormidel v křížovém uspořádání, které byly upevněny na jakési veslovací dřevěné tyči směřující za „trup“ stroje. Kvůli stáří však sám Angličan neletěl. Místo toho do kluzáku posadil svého kočího, ten byl však z letu vyděšen a kvůli tomu šlo sice o úspěšný stabilní, nikoliv však řízený let. V použití těchto pohyblivých ploch vidíme první kormidla založená na principu používaném u dnešních letounů. Je možné, že Cayleyho inspirovaly některé koncepce tehdejších balonů, které byly vybaveny „pádly“, pomocí nichž posádka veslovala vzduchem a usměrňovala tak let. Cayley tak byl první, kdo použil tento typ řízení na čemsi, co připomínalo letoun podle definice uvedené na začátku práce.



Obrázek 4-1 Říditelný kluzák Sira Cayleyho z r. 1853. Všiměme si křížového kormidla pro usměrnění letu. [8, s. 20]

Za zmínku stojí fakt, že kluzák byl podélně vyvažován závažím posouváním dopředu a dozadu, což patří mezi prostředky řízení současných kluzáků. Na obr. 4-1 je vidět verze kluzáku z roku 1853.

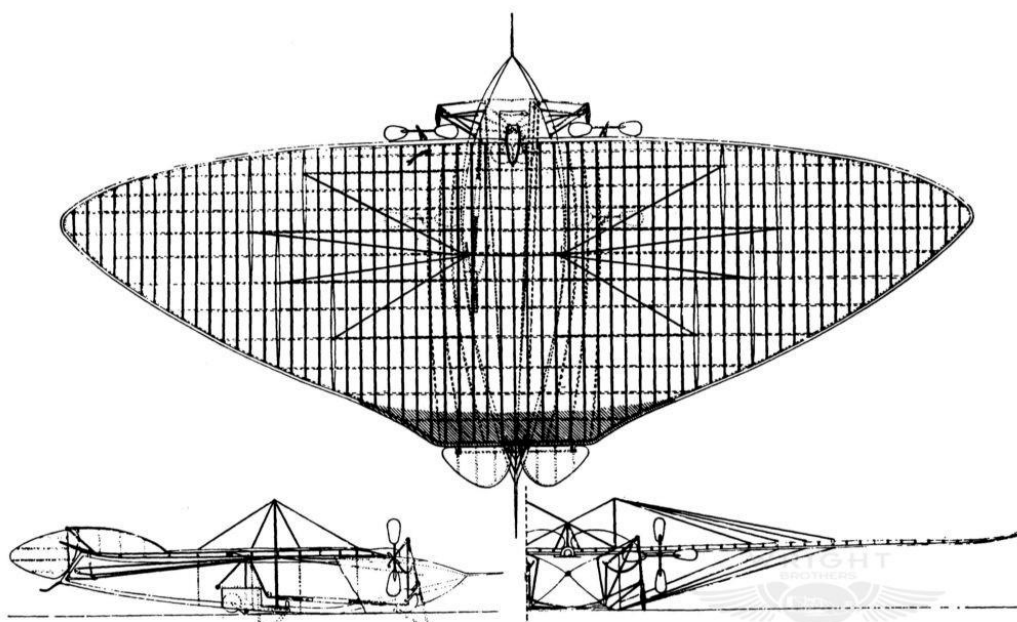
Dnešní literatura zmiňuje také další pokus o řízený let z 50. let 19. století. Jednalo se o pokus Louise Charlese Letura při letu se svým parašutistickým kluzákem. Na tomto zařízení můžeme sledovat lany ovládané plochy kormidel k usměrnění letu.



Obrázek 4-2 Leturův parašutistický kluzák se soustavou kormidel. [12]

### **Bezocasé letadlo s říditelnými kormidly**

Alphonse Pénaud byl francouzský inovátor strojů těžších než vzduch, nazýván též jako „otec létajících modelů“. Mimo své velmi úspěšné modely letounů, které byly poháněny vrtulí na gumičce a byly vybaveny křížovými, avšak nepohyblivými (pouze stabilizačními) ocasními plochami, je znám také jeho návrh bezocasého letadla Amphibian z r. 1876, které předběhlo dobu. Plány této konstrukce jsou podrobně dochovány díky pečlivým Pénaudovým nákresům.



Obrázek 4-3 Pénaudovo bezocasé letadlo "Amphibian". [12]

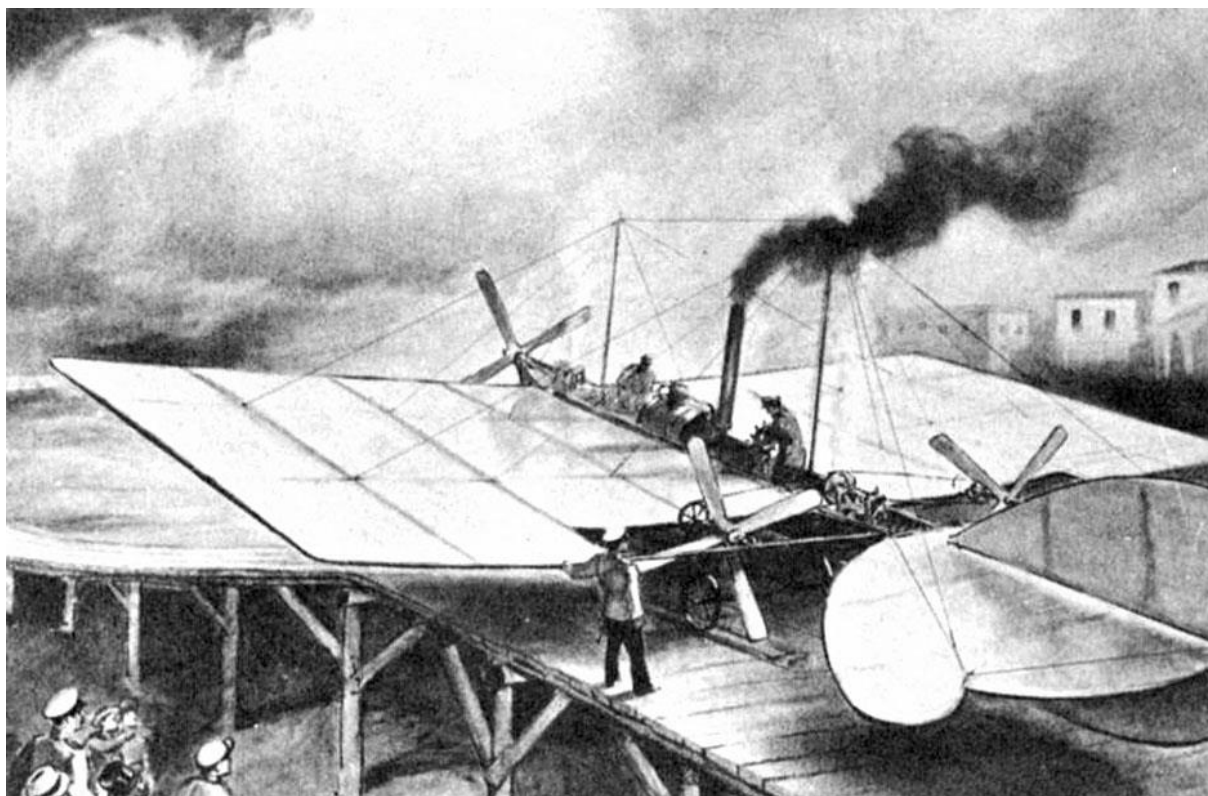


Koncepce letounu nemá klasické ocasní plochy, avšak výškové i směrové kormidlo je křížové a důmyslně umístěné na samotném křídle. Celá konstrukce je kovová, tažená vrtulemi, viz obr. 4-3. Pénaud spáchal sebevraždu poté, co francouzská letecká správa zamítla jeho žádost o sestrojení tohoto stroje, ten tak zůstal pouze ve fázi konceptu.

### **Vzduchoplavecký náboj s kormidly do kříže**

Stejně jako Pénaudův Amphibian zůstal i tento koncept letounu pouze na papíře ve formě nákresu. Jednalo se o stroj ruského důstojníka A. F. Možajského pojmenovaného Vzduchoplavecký náboj (překlad). K jeho řízení použil Možajskij vodorovnou plochu vychylující se vzhůru a dolů a svislou plochu pohybující se do stran. Tato kormidla byla umístěna v zadní části letounu do kříže. Do vzduchu se letoun nedostal kvůli nedostatečnému tahu, který byl důsledkem důmyslně lehkého, avšak málo výkonného parního stroje pohánějícího vrtule.

Přesný technický náčrt se nedochoval. Je známo, že skutečný Možajského stroj se odlišoval od patentního podání. Snaha o rekonstrukci fotografií a plánů letounu nám pomůže pochopit princip jeho řízení, viz obr. 4-4.

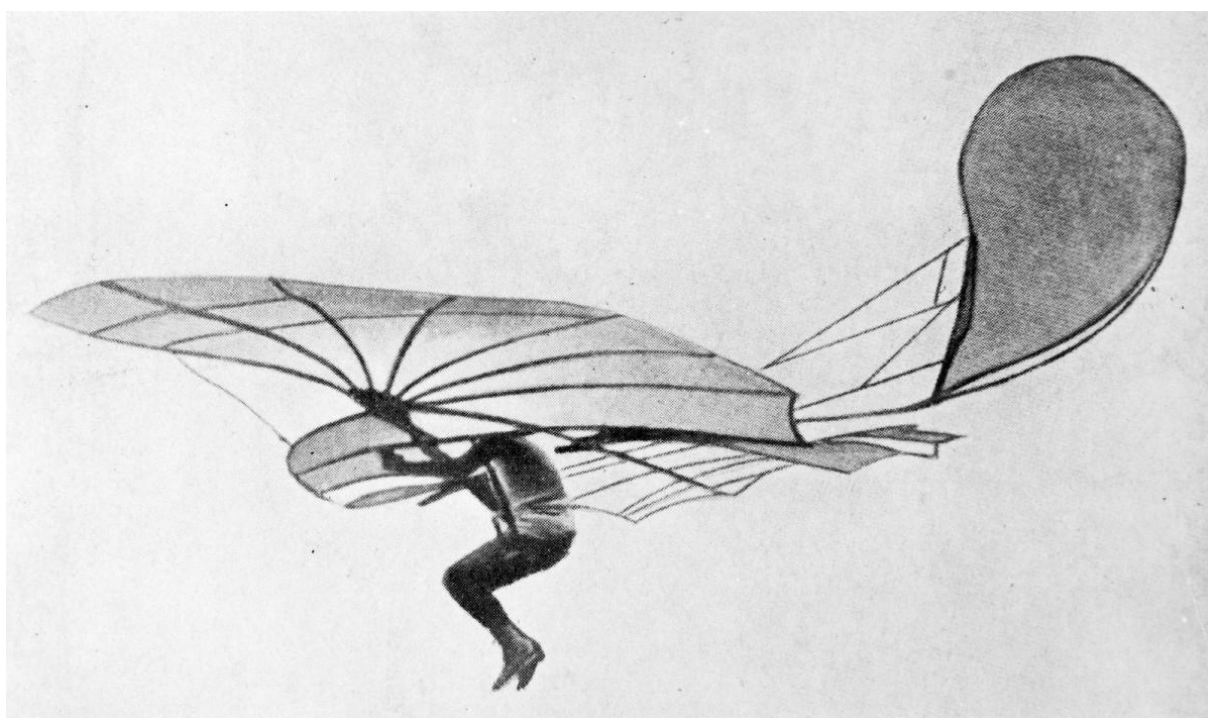


*Obrázek 4-4 Vzduchoplavecký náboj důstojníka Možajského s řízenými kormidly. [8, s. 27]*

### **Kluzáky řízené změnou centraže**

Otto Lilienthal, syn německého obchodníka se sukrem, patří mezi velké průkopníky aviatiky, i když se mu nakonec jeho vášeň stala osudnou. Když se přeživší vrátil z válečné fronty, měl dostatečnou motivaci s bratrem pokračovat na svých konstrukcích kluzáků, kterých postavili v 90. letech 19. století nepřehledné množství.

Jejich inventář čítal téměř 20 verzí, každá další byla lepší než ta předchozí. Jeho kluzáky neměly řiditelné ocasní plochy, ty nicméně byly již v dnešním klasickém uspořádání. Zajímavostmi z pohledu řiditelnosti jsou mávající konce křídel některých verzí, které mohly sloužit k nabírání vztaku a tahu a sloužit tak jako jakési prostředky klonění. Samotné řízení však Otto prováděl změnou polohy centraže, totiž pohybem svého na kluzáku zavěšeného těla dopředu, dozadu a do stran. To se mu však i přes jednoduchost a intuitivitu stalo osudným, když jednou jeho kluzák naklopil poryv větru dozadu. Tehdy Němec zareagoval švihem nohou dopředu, avšak neodhadl situaci a centraž předsunul až příliš. Kluzák se naklonil dopředu a střemhlav se zřítil k zemi. Otto pár dní na to umírá, nicméně jeho práce ovlivní mnoho dalších konstruktérů, např. Percy Pilchera, který stavil velmi podobné kluzáky, též řízené změnou centraže těla.



Obrázek 4-5 Kluzák O. Lilienthala řízený změnou centraže za letu. [17]

### **Kluzák s výškovkou**

Polský konstruktér Czesław Tański na konci 19. století sestrojil několik kluzáků, které se značně podobaly těm Lilienthalovým. Jednalo se spíše o jeden stroj různých verzí. Pozdější verze jeho aparátu Lotnia nemá statické, nýbrž mávací křídla a je vybavena řiditelnou výškovkou umístěnou za křídly, která značně ovlivnila možnosti řízení letu.



### **Trojplošník s měnitelnou geometrií křídel**

Mimo evropské dění zažívala rozvoj aviatiky také Amerika. Od 70. let 19. století se zde problematice letu začal věnovat Octave Chanute, rodilý Francouz. Úzce spolupracoval s O. Lilienthalem, jehož práci se inspiroval. Stavěl bezmotorové kluzáky podobné těm Lilienthalovým a princip řízení převzal také od něj, tedy změnou polohy těla vůči kluzáku působil jeho naklánění a tím změny směru i rychlosti letu.

To však neplatilo u jeho trojplošného kluzáku, který zalétl v roce 1902. Tento stroj Američan neřídil změnou centraže, ale pohybem křídel dopředu a dozadu. Měnil tak geometrii křídel ze záporného úhlu šípů do kladného.

### **Netopýří Avion Éole s pohyblivými křídly**

Velmi nevšední koncepci letounu představuje Avion Éole francouzského inženýra Clémenta Adera, u kterého vidíme inspiraci přírodou v pravém slova smyslu. Navrhl, zkonstruoval a můžeme říct úspěšně odlepil od země letoun, který značně připomínal netopýra. Skutečný let stroj nevykonal, pouze se vznesl asi 5-10 cm nad zem podle svědectví zahradníků, kteří asistovali této události při startu Éoly z písčité, udusané cesty. Letoun neměl ocasní plochy a Ader ho řídil pomocí za letu měnitelné geometrie křídla po vzoru netopýra, které mohlo měnit své těžiště, rozpětí, úhel náběhu i křivky profilu.

Aderova práce probíhala v utajení, avšak poslední verze jeho letounu Avion No.3 je dodnes zachována a poskytuje ucelenou představu o jeho funkci. Na této třetí verzi stroje můžeme spatřit svislou směrovku, i když poměrně malou. Je spojena s ostruhovým kolem a letoun se tak dal řídit i při rozjezdu po zemi. Na svých strojích pracoval Ader od 80. let 19. století. Éolu dokončil v roce 1890, Avion No.3 pak v roce 1897. Různé části křídla Éoly se mohly pohybovat buď stejně, nebo v diferenciální závislosti. Konkrétní pohyby pro jednotlivé plánované změny letu si však Ader nechal pro sebe. Jeho pokusy o vzlet skončily neúspěšným prvním startem třetího Avionu. Podoba Avionu No.3 je uvedena na obr. 4-6.



*Obrázek 4-6 Avion No.3. [13]*

### **Shrnutí**

Otázkou říditelnosti se letečtí průkopníci začali intenzivněji zabývat ve druhé polovině 19. století, přičemž sledujeme dva hlavní směry vývoje principů řízení.

První z nich představuje řízení letounu výškovým a směrovým kormidlem, které představovaly nejčastěji plátnem či jinou látkou potažené jednoduché dřevěné konstrukce. Všimněme si, že doposud se setkáváme pouze s řízením zatáčení a klopení, díky čemuž mohl stroj stoupat/klesat a zatáčet do stran. Orgány řízení zde byly ovládány systémem táhel vedoucích k pilotovi.

Je zřejmé, že všichni inovátoři, kteří použili k řízení letounu kormidel, museli tak učinit na základě dřívějších poznatků. Inspirací jim byli ptáci, kteří svými ocasy kormidlovali vzduchem a plachetnice, které zatáčení řídily kormidlem. Pro pohyb nahoru a dolů stačilo přidat další, vodorovné kormidlo. Povšimněme si absence kontroly klonění, s kterýmžto jako

problémem se potýkaly i plachetnice při působení silného bočního větru. Toto bylo vyřešeno umístěním těžiště co nejnižší do trupu lodě, pohyb tak byl stabilizovaný, nikoliv však řízený. Aviatci předpokládali, že u letounu toto bude fungovat stejně a rotační vychýlení okolo podélné osy bude stabilizované a že klonivého řízení nebude třeba. Ukázalo se, že tomu tak není. Jak se dočteme dále, tento problém vyřešili až bratři Wrightové.

Jinou cestu našli konstruktéři kluzáků, kteří při praktickém zkoušení svých strojů spolu s pozorováním létajících ptáků přišli na intuitivní způsob řízení letu změnou těžiště letounu, které dosáhli pohyby svých těl. V tomto případě sledujeme opět řízení dvou rotačních stupňů volnosti, díky kterým kluzák mohl stoupat/klesat a klonit. Po naklonění na stranu již nepůsobila vztlaková síla kluzáku kolmo vzhůru oproti tíhové síle a táhla celek do strany. Letadlo tak mohlo zatáčet. Tento systém byl sice jednoduchý, avšak nepraktický a nevyzpytatelný. Řada aviatiků se po ztrátě kontroly nad letounem zřítíla a kvůli své vášni pro let přišli k mnoha úrazům, v některých případech smrtelným.

Díky publikacím a článkům, které průkopníci uveřejňovali v evropských i amerických časopisech, je vývoj řízení a konstrukce strojů těžších než vzduch v posledním desetiletí 19. století velmi intenzivní. Nikomu se však nedařilo dostat do vzduchu stroj jeho vlastní silou při plné kontrole letu pilotem a neexistuje téměř žádný spis (vyjma Lilienthalových tabulek vztlaku) popisující chování letounu ve vzduchu a jeho kontrolu. V tomto období probíhá nejintenzivnější vývoj letounů v Evropě, především v Německu, Francii a Británii, a v amerických zemích a inovační práci aviatiků motivují soutěže s hodnotnou odměnou za různé aviatické dovednosti.

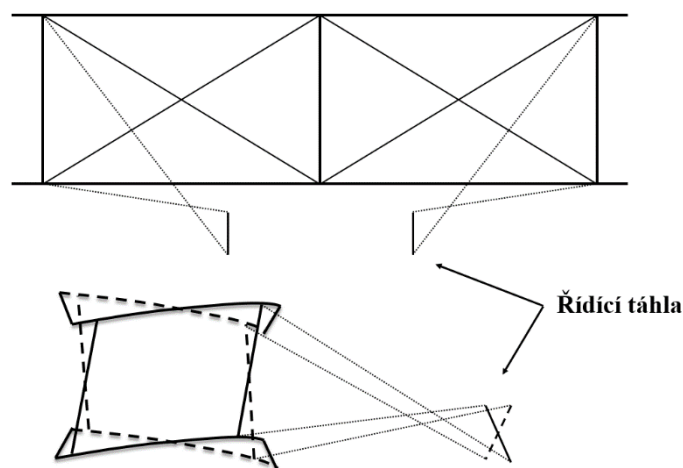
## 4.2 Přínos bratři Wrightových

Wilbur a Orville Wrightové předvedli 17. prosince 1903, jak uvádí literatura, první úspěšný řízený let strojem těžším než vzduch, který se vznese svou vlastní silou. Velmi důležité je zde slovo *řízený*. Wrightové věděli, že pro úspěšný, praktický a bezpečný let je třeba jej celý řídit, proto bylo vyřešení problému řízení jejich stroje stěžejní.

Stavbě letounu a jeho řízení se začali intenzivně věnovat od roku 1899, i když mnohé články, zajímavosti a mechaniku letu sledovali už od dětství. Sbírali informace, které uveřejňovali aviatci uvedení v předešlé podkapitole i jiní, přičemž milníkem v jejich výzkumu byla událost z výše uvedeného roku. Tehdy poté, když Wilbur prodával zákazníkovi duši do cyklistického kola ve svém obchodě (bratři vlastnili továrnu na výrobu jízdních kol), a hračku, kterou vytáhl z obdélníkové krabice, při komunikaci se zákazníkem zjistil, že pokud k sobě přitlačí protilehlé rohy krabíčky, celá se zkrouť. Wilbur a Orville díky předchozímu výzkumu a vědomostem věděli, že pokud se jim podaří křídlo zkroutit jako krabíčku, nakloní se díky většímu vztlaku na jedné straně oproti menšímu na té druhé a začne zatáčet. Vzniklý rozdíl velikostí vztlaků na koncích křídel je důsledkem rozdílných úhlů náběhu proudu vzduchu.

Pro kroucení křídel zkoušeli bratři různých mechanismů, které však byly často složité a nepraktické. Myšlenka kroucení křídla přitažením protilehlých rohů dvoukřídla k sobě představovala mnohem jednodušší a důmyslnější systém k dosažení klonění, než jaký doposud bratři vyzkoušeli. Wilbur neváhal, postavil model dvoukřídla - draka řízeného soustavou táhel - a po zalétnutí a potvrzení předpokládaných změn směru letu začíná intenzivní práce a výzkum na nových modelech.

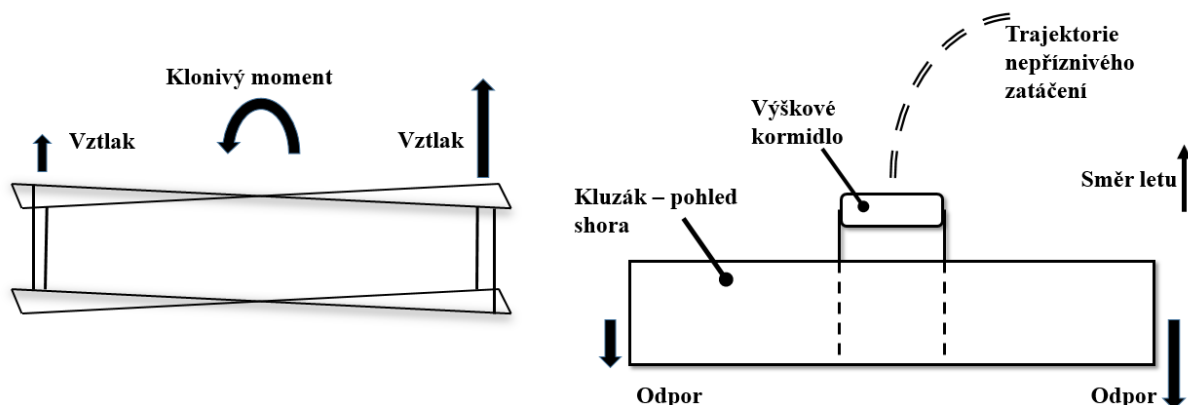
Během let 1899-1903 Wrightové staví modely kluzáků ve tvaru dvoukřídla, na nichž zkouší a zdokonalují svůj systém řízení klonění. Ke kroucení křídel, které funguje podle očekávání, přidávají na model výškové kormidlo umístěné před křídly (dnes známo jako uspořádání „kachna“). Rozšíří tak možnosti letu o klopení.



Obrázek 4-7 Princip kroucení křídel pomocí přitahování protěžších konců dvojkrídla k sobě. Schéma modelu, na kterém Wilbur Wright tento princip odzkoušel. [12]

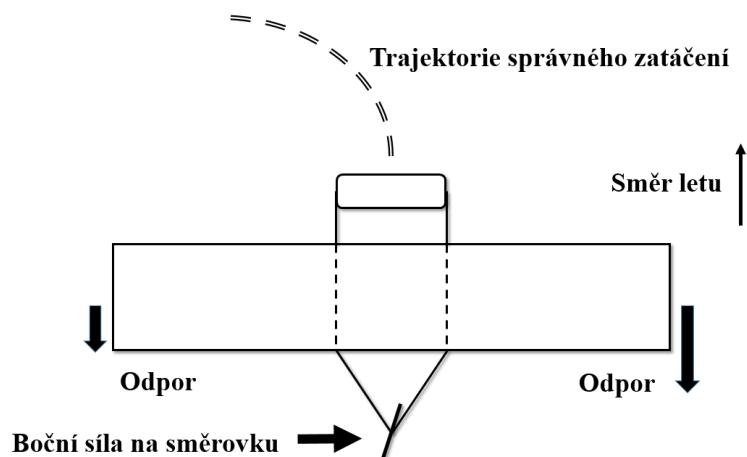
### Aerodynamická vazba mezi zatáčením a kloněním

Během testování kroucení křídel přijdou Wrightové na velmi důležité zjištění, totiž že konec krouceného křídla pohybující se vzhůru má oproti druhému konci křídla kromě většího vztlaku také větší odpor. Tato skutečnost způsobí nepříznivé zatáčení kluzáku do opačného smyslu zamýšlené zatáčky.



Obrázek 4-8 Vznik nepříznivého zatáčení jako důsledek většího odporu konce křídla pohybujícího se při klonění vzhůru.

Tento problém se bratři pokusili vyřešit instalací svislého stabilizátoru za křídla kluzáku, což však problém nepříznivého zatáčení nevyřešilo. V tom jim nakonec pomohla modifikace fixního stabilizátoru v pohyblivé kormidlo, které bylo možné vychylovat do stran. Tyto výchylky byly svázány s kroucením křídel a upravovány v závislosti na jeho velikosti, přičemž aerodynamická síla na jedné ze stran kormidla vyrušila výše zmíněné nepříznivé zatáčení a kluzák zatáčel do plánovaného směru, viz obr. 4-9.



Obrázek 4-9 Potlačení nepříznivého zatáčení vychýlením svislého kormidla ve smyslu plánované zatáčky.

Takto Orville a Wilbur vytvořili důmyslný a jednoduchý systém ovládání letounu pomocí tří rotačních stupňů volnosti. Zbylé tři, stoupání, pohyb vpřed a do stran, jsou řízeny zprostředkovaně. Po tomto úspěchu Wrightové experimentují se spalovacím motorem pro pohon vrtulí a spolu s doladěným tvarem křídel pro dostatečný vztlak a minimální odpor poprvé vzletnou z písčných dun pláže v Kitty Hawk v Severní Karolíně. Datum 17. prosince 1903 se navždy zapíše do dějin aviatiky a princip řízení jejich Wright Flyeru přetrvá dodnes.

### 4.3 Vývoj po roce 1903

Po svém významném letu podávají Orville a Wilbur patent na svůj Wright Flyer, jehož nejvýznamnější součástí je tříosý řídicí systém. Úspěšně. Ve svém objevu vidí bratři počátek velkého byznysu a svůj vynález předvádí na svých cestách po USA a v Evropě. Svým počínáním však také nechtěně dávají impuls mnoha konstruktérům k napodobení, ba co víc zdokonalení jejich koncepce a události nabírají velký spád. Objevuje se řada letounů a první velké letecké továrny a společnosti. Všechny stroje jsou založeny na principu řízení Flyeru a člověk dobývá nebesa.

Během prvního a druhého desetiletí 20. století jde vývoj letounů mílovými kroky vpřed, především díky různorodým soutěžím slibujících vysoké odměny za nové aviatické rekordy. Neopomenutelnou částí přispěla k urychlení vývoje také první světová válka. Už během konce první dekády se v Evropě objevují letouny, které nahrazují křivení konců křídel samostatnými plochami zavěšenými na koncích křídel – křídélky. Wrightovské „kachní“ uspořádání ztrácí na významu a výškové i směrové kormidlo se přesouvá za křídla. Plovoucí konfiguraci výškovky a směrovky, tzn. pohyblivé kormidlo zavěšené na trupu letounu, nahrazuje vychylovací plocha zavěšená na stabilizační části ocasních ploch, které jsou pevně spojeny s trupem. Utváří se tak klasická koncepce letounu jak jej známe dnes.

Vychylování kormidel a křidélek je zprostředkováno táhly, která vedou od řídicího vlna v pilotní kabině. Tato řídidla představují řídicí volanty, řídicí páky a pedály, přičemž řízení je přímé, tzn. táhla přímo propojují řídicí plochy s řídidly.

## 4.4 Řídicí síly

Tlak druhé světové války a dalších válečných konfliktů na konstrukci letounu a stále větší požadavky na jeho schopnosti, mezi které patří např. vyšší letové rychlosti, větší rozsah režimů letu, lepší obratnost, vedou ke vzniku odolnějších, robustnějších a pevnějších konstrukcí nejen trupu a křídel, ale také řídicích ploch. Jsou nově použity kovové materiály (hliník, ocel) a od dřevěných celků se upouští. Vyšší rychlosti a náročnější režimy letu však dají vzniknout příliš velkým řídicím silám, které je potřeba udržovat na přijatelné úrovni a nějakým způsobem ovlivňovat.

Řídicí síly jsou síly, které vznikají na řídidlech v pilotní kabině a kterými na řídidla pilot působí, pokud chce změnit režim letu. Vznikají jako důsledek aerodynamických sil, které vznikají na ploše kormidla při jeho vychýlení do nabíhajícího proudu vzduchu. Abychom kormidlo vychýlili do potřebné polohy, musíme tyto aerodynamické síly překonat prostřednictvím řídidel, které jsou spjaty s kormidly skrz řídicí soustavu. Příliš velké, resp. příliš malé řídicí síly jsou z hlediska řízení letounu nežádoucí, protože je pro pilota obtížné řídit letoun bez značného fyzického a psychického úsilí, resp. neposkytují pilotovi dostatečnou zpětnou vazbu pro intuitivní řízení, kdy je letoun možné snadno přetížit. O ovlivňování řídicích sil pojednává poslední kapitola této práce.

## 5 SOUČASNÉ PROSTŘEDKY ŘÍZENÍ LETOUNU

Jak bylo řečeno výše, princip řízení letounu pomocí tří rotačních stupňů volnosti přetrvává od dob bratrů Wrightových až dodnes. Během 20. století se však utvářely moderní prostředky řízení a díky novým technologiím je jejich současné provedení daleko sofistikovanější než na počátku 20. století.

Následující kapitola je rozdělena do dvou podkapitol, ve kterých jsou jednotlivě popsány současné klasické a nekonvenční prostředky řízení letounu a jejich principy.

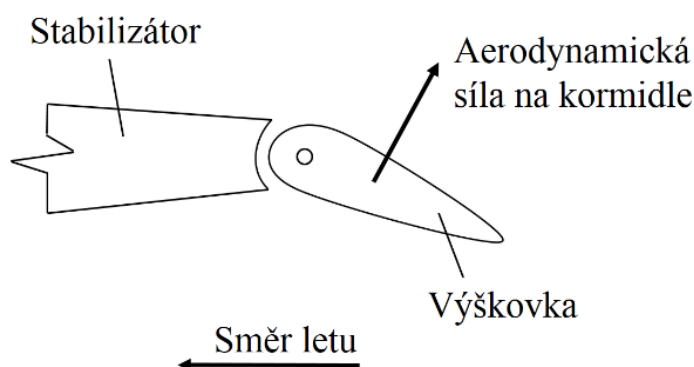
### 5.1 Klasické prostředky řízení letounu

Do klasických prostředků řadíme kormidla v klasickém uspořádání. Jsou to křídélka na koncích křídel a výškovka se směrovkou umístěné na ocasních plochách letounu.

#### 5.1.1 Výškové kormidlo

Výškové kormidlo (výškovka) je v klasickém provedení realizováno jako pohyblivá část letounu zavěšená na vodorovném stabilizátoru v zadní části trupu. Obě tyto části spolu tvoří VOP, které slouží jak ke stabilizaci letounu, tak ke změnám režimu letu (klopení). Vychýlením výškového kormidla směrem vzhůru se změní geometrie VOP (její křivost) a poklesne na ní vztlak, v důsledku čehož vznikne klopivý moment k těžišti letounu (které je umístěno před ocasními plochami). Díky tomuto momentu začne letoun stoupat. Naopak při vychýlení výškovky dolů se vztlak na VOP zvýší. Vzniklý moment pak uvede letoun do klesání.

Při vychylování vzniká na kormidle aerodynamická síla, která se jej snaží vrátit do původní polohy. Tato síla je ve skutečnosti silovým působením rozloženým na ploše kormidla, které působí na kormidlo závěsovým momentem vztaženým k ose otáčení kormidla. Tento moment je potřeba překonat řídicí silou na řídicíle, abychom požadované výchylky dosáhli.



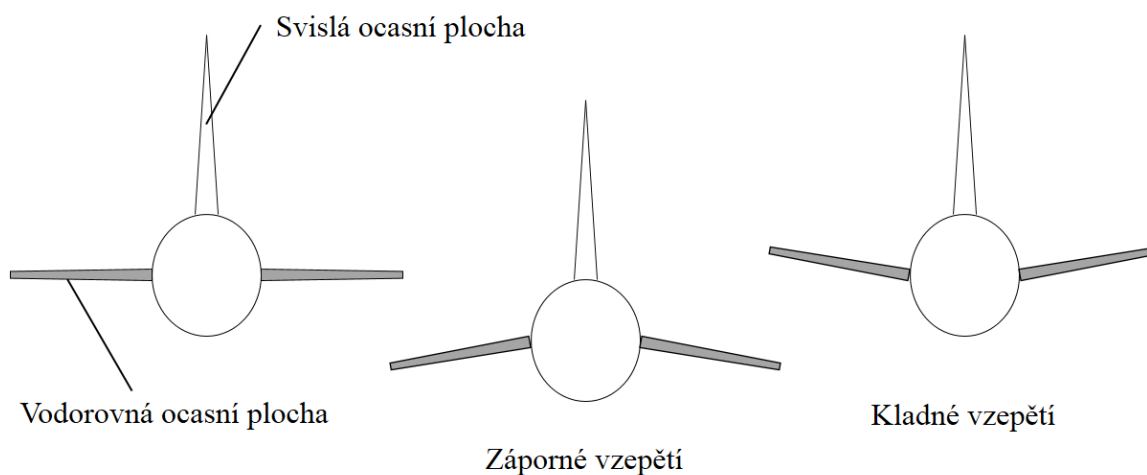
Obrázek 5-1 Aerodynamická síla na kormidle, jejíž důsledkem je vznik závěsového momentu kormidla. [10, s. 102]

VOP mohou být umístěny přímo na trupu v jeho zadní části, na SOP (křížové uspořádání), nebo v horní části SOP (uspořádání do tvaru „T“), viz obr. 5-2. Pokud je letoun dvoutrupý, je VOP nejčastěji umístěna mezi zadní konce trupů a tvoří jednu celistvou část.



Obrázek 5-2 Některé z možných uspořádání VOP na letounu.

VOP na současných letounech mohou mít také kladné, nebo záporné vzepětí. Vždy v závislosti na tom, pro jaký konkrétní účel je letoun zkonstruován. Se záporným vzepětím se nejčastěji setkáme u vojenských letounů, kladné je pak charakteristické pro velká dopravní letadla, viz obr. 5-3. Profil VOP je ve většině případů symetrický.



Obrázek 5-3 Možnosti vzepětí VOP.

Výškovka může být také konstruována jako plovoucí, tzn., že celá VOP je vychylovatelná a zavěšená přímo na trupu letounu. Jinými slovy zde chybí fixní stabilizační část. S tímto konceptem se nejčastěji setkáme u vojenských letounů, u kterých je kladen požadavek vysoké obratnosti.

Půdorysná geometrie výškovky je v současnosti řešena především jako lichoběžník. Zaoblená geometrie však není výjimkou. Výhodou lichoběžníkového tvaru je (stejně jako u křídel) snazší výpočet při návrhu letounu.

Jak výškové, tak i směrové kormidlo je třeba hmotnostně vyvažovat pro zamezení vzniku fluteru (třepetání), který je v oblasti letectví nepřipustný.

Mimo klasické konfigurace VOP můžeme dnes na letounech spatřit i netradiční uspořádání výškovky v podobě VPP. To platí i pro svislé kormidlo. O těchto případech bude pojednáno v podkapitole o nekonvenčních prostředcích řízení.

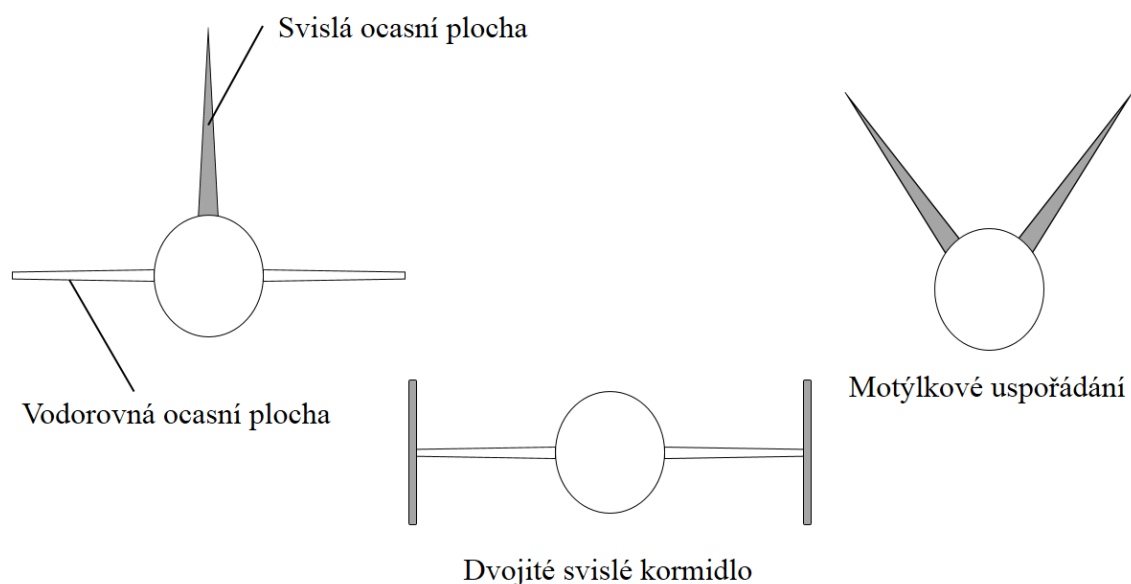
### 5.1.2 Směrové kormidlo

Směrové kormidlo (směrovka) je podobně jako výškovka realizováno jako pohyblivá část SOP. V klasickém uspořádání je SOP umístěna na zadní části letounu. Na rozdíl od VOP je SOP ve většině případů uspořádána jako nesymetrická vzhledem k trupu letounu – je tvořena

pouze jednou částí, která je umístěna na horní zadní části trupu. Setkáme se však i s uspořádáním, kdy je na letounu umístěno více směrovek, např. u dvoutrupých, vojenských a velkých dopravních letounů. Stejně jako u VOP je profil SOP symetrický a vychýlením kormidla na jednu stranu vznikne zatáčivý moment k těžišti, který uvede letoun do zatáčky. Podobně jako u ostatních kormidel i na směrovce vzniká závěsový moment, který je potřeba překonat řídicí silou na řídidle pro dosažení požadované výchylky.

Tak jako u výškového kormidla, je možno konstruovat směrovku jako plovoucí, kdy sledujeme absenci kýlu. To je však méně časté a charakteristické spíše pro vojenské vysoce manévrovací letouny. Půdorysná plocha kormidla je nejčastěji řešena jako lichoběžník, setkáme se však i se zaoblenou geometrií.

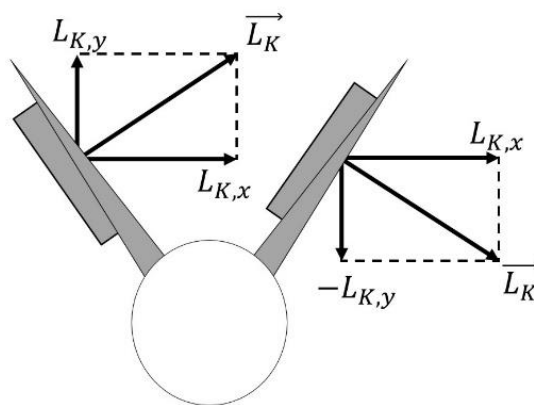
Některé z možných konfigurací směrovky jsou znázorněny na obr. 5-4, při její volbě vždy záleží na konkrétním úkolu letounu a požadavcích, pro které je konstruován. Nejčastěji se setkáme s dříve uvedeným uspořádáním jednoduchého kormidla v horní části trupu (na obr. 5-4 první zleva).



Obrázek 5-4 Některé z možných uspořádání svislých ocasních ploch.

Motýlkové uspořádání představuje spojení funkce výškovky a směrovky, kdy při souhlasných výchylkách obou kormidel konfigurace funguje jako směrovka, nebo výškovka. Při diferenciaci výchylek pak konfigurace může fungovat jako směrovka i výškovka dohromady. Mezi hlavní nevýhody této konfigurace patří složitější systém řízení diferencování výchylek a fakt, že při určitých výchylkách kormidel dochází k nepříznivému zkrucování trupu, viz rozklad aerodynamických sil do vodorovných a svislých složek na obr. 5-5. K zatáčení využijeme pouze vodorovné složky vztahové síly kormidla  $L_{K,x}$ . Svislé složky  $L_{K,y}$  a  $-L_{K,y}$  nepříznivě namáhají trup krutem.





Obrázek 5-5 Nevýhoda motýlkového uspořádání – namáhání trupu krutem.

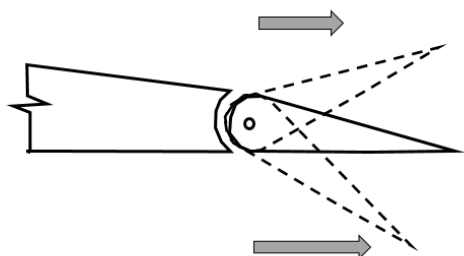
### 5.1.3 Křídélka

Tato kormidla jsou v současnosti řešena jako pohyblivé plochy zavěšené na křídlech v blízkosti odtokové hrany. U velkých dopravních letounů jsou dnes k vidění dva druhy křidélek na jednom křídle, přičemž jedny jsou menší a umístěny blíže k trupu. Tato křídélka se používají při vysokých rychlostech, kdy kormidla vzdálenější od trupu jsou příliš citlivá pro bezpečné manévrování, při kterém jsou křídla namáhána velkým krutem, vlivem čehož by u poddajných křídel mohlo dojít k reverzi řízení.

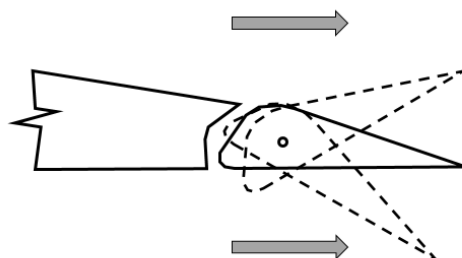
Jak bylo uvedeno v kapitole 4.2, klonění je aerodynamicky svázáno se zatačením, proto je při vychylování křidélek nutno potlačit nepříznivý zatačivý moment vychýlením směrovky ve smyslu požadované zatačky. Při řízení letounu je tedy nutné při klonění doleva vychýlením řídicí páky na levou stranu sešlápnout levý pedál pro souhlasné vychýlení směrovky.

Kromě nepříznivého zatačivého momentu vzniklého při klonění odlišnými úhly náběhu na konce křídla vzniká při příčném řízení také jiný parazitní zatačivý moment. Je to důsledek většího odporu na straně křídla s křídélkem vychýleným dolů při stejně velkých výchylkách křidélek. Tento moment lze odstranit např. diferencovaným vychylováním křidélek, kdy křídélko pohybující se vzhůru bude mít větší výchylku než protilehlé křídélko. Eliminujeme tak rozdíl přírůstků odporu na levém a pravém křídle. Jinou možností odstranění tohoto momentu nám umožní použití křidéla typu Frise, které má při vychylce nahoru stejný přírůstek odporu jako při vychylce dolů.

Výchylka vzhůru – menší nárůstek odporu křídla



Výchylka dolů – větší nárůstek odporu křídla



Křídélko typu Frise – stejný nárůstek odporu křídla

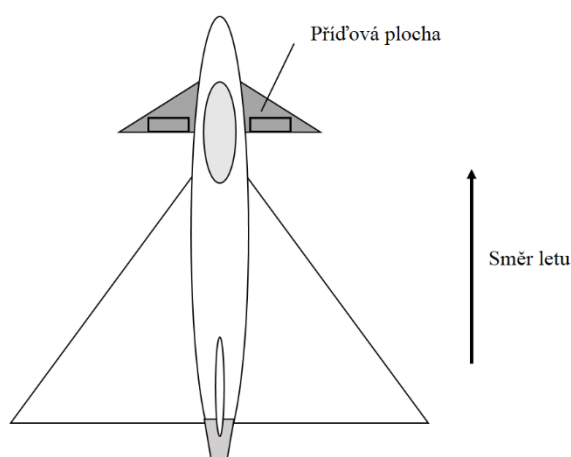
Obrázek 5-6 Křídélka typu Frise - vyrovnání odlišně velkého odporu při stejně velkých výchylkách křidélek. [10, s. 132]

Klonění pomocí křidélek je u některých letounů s požadavkem na vysokou obratnost podporováno pomocným klonivým momentem od nesymetrických výchylek plovoucích VOP, které se nazývají elevony. Kombinují princip výškovky (angl. elevator) a křidélek (angl. ailerons).

## 5.2 Nekonvenční prostředky řízení letounu

### 5.2.1 Příďové plochy

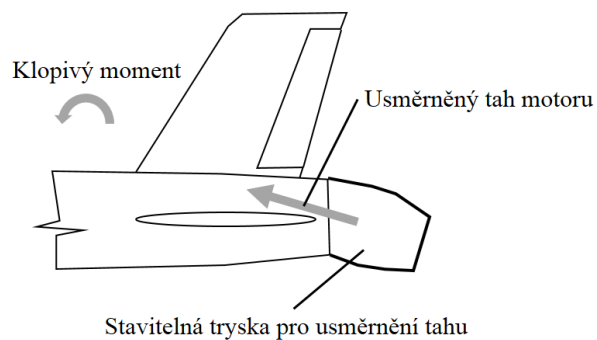
Jak bylo uvedeno dříve, směrovku i výškovku je možno umístit na příď letounu do kachního uspořádání, případně touto konfigurací doplnit ocasní plochy. To nejčastěji vidíme opět u vojenských letounů. Princip funkce příďových ploch je opačný, než je tomu u ocasních ploch. Momenty vzniklé vychýlením kormidel totiž působí vůči těžišti, které je nyní umístěno za nimi, v opačném smyslu. Výhodou příďových ploch obecně je zvýšení vztlaku letounu oproti klasické koncepci (stabilizační silové působení musí působit vzhůru), k nevýhodám však patří horší stabilita letounu (což je však u vojenských letadel někdy žádané) a ovlivnění vztlaku křídla úplavem za těmito plochami. Velkou výhodou VPP je nemožnost přetažení letounu. VPP jsou totiž uspořádány s větším úhlem nastavení oproti křídlu, díky čemuž ztratí funkčnost odtržením proudu vzduchu dříve než nosná plocha. U VOP je tomu naopak. Kvůli citlivosti řízení zvláště ve vysokých rychlostech jsou přední kormidla řízena elektronicky prostřednictvím počítačové řídicí jednotky.



Obrázek 5-7 Koncepte příďových ploch - letoun typu "kachna".

### 5.2.2 Vektorování tahu

Ve druhé polovině dvacátého století byl vyvinut nový prostředek řízení, který využívá ke změnám režimů letu vektorování tahu pohonné jednotky. Změnou směru vektoru tahu dojde ke vzniku momentu k těžišti letounu, který vyvolá požadovanou změnu směru letu. Nejčastějšími typy letounů s tímto typem řízení jsou stroje s tryskovým/proudovým motorem, které usměrňují spaliny tryskou motoru. Princip vektorování tahu je uveden na obr. 5-8.



Obrázek 5-8 Princip řízení vektorováním tahu.

### 5.2.3 Diferenciace tahu u vícemotorových letounů

Jedná se o podpůrný způsob řízení, kdy odlišnou velikostí tahu pohonných jednotek na jedné straně křídla oproti druhé vyvoláme zatáčivý moment.

### 5.2.4 Změna centráže

Jeden z nejstarších způsobů řízení, o kterém bylo pojednáno v kapitole 4.1, je dnes používán v malé míře, zejména pro řízení závěsných kluzáků.

## 6 OVLIVŇOVÁNÍ ŘÍDICÍCH SIL

Při pojednání o řídicích silách v kapitole 4.4 bylo uvedeno, že je nutno tyto síly ovlivňovat tak, aby bylo pro pilota řízení v co největší míře intuitivní a pohodlné. Velikosti řídicích sil na kormidlech se v průběhu letu mění v závislosti na jeho rychlosti a obecně na parametrech daného letového režimu. V určitých fázích letu tyto síly vznikají i v ustálených režimech a i sebemenší síly jsou z dlouhodobého hlediska řízení nežádoucí. Snahou konstruktéra je pak tyto síly odstranit, resp. vyvážit.

Mimo vyvážení můžeme řídicí síly také odlehčit, což znamená jejich neúplnou eliminaci, ale pouze zmírnění jejich velikosti. To je ocenitelné především při dlouhodobých výchylnkách kormidel, např. při nežádoucí poruše letu a nutnosti použít některá kormidla po zbytek letu k jeho stabilizaci.

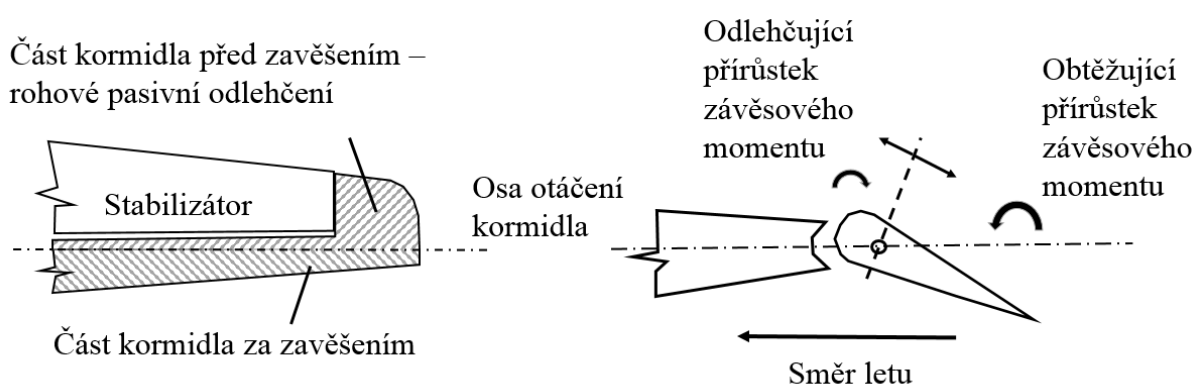
Pro snížení řídicích sil nám slouží především ovlivnění závěsového momentu na kormidlech. Vyvažování a odlehčování se týká především výškového a směrového kormidla, u křidélek se používá méně často.

V dalším textu jsou uvedeny nejznámější principy ovlivňování řídicích sil.

### 6.1 Aerodynamické pasivní osově odlehčení

Závěsový moment vzniká jako důsledek spojitého tlakového působení na kormidlo, které je nerovnoměrně rozloženo po jeho ploše. Pokud rozdělíme kormidlo na část umístěnou před a část umístěnou za jeho osou otáčení, vzniknou dvě pomyslné plochy, z nichž ta, která je za osou zavěšení vytváří nepříznivou část závěsového momentu, kterou je potřeba překonat řídicí silou. Část kormidla před zavěšením působí proti tomuto nepříznivému závěsovému momentu. Pokud je tedy část umístěná před osou zavěšení dostatečně velká, může zmenšit řídicí sílu na požadované minimum k řízení přijatelné.

V některých případech můžeme na letounech spatřit tuto pasivní odlehčovací plochu zasahující až k náběžné hraně ocasní plochy, tehdy mluvíme o rohovém pasivním odlehčení, viz obr. 6-1. Výhodou těchto ploch je, že jsou bezprostředně součástí samotného kormidla a tvoří s ním ucelenou část, k jejich ovládání tedy není třeba dalších podpůrných mechanismů.

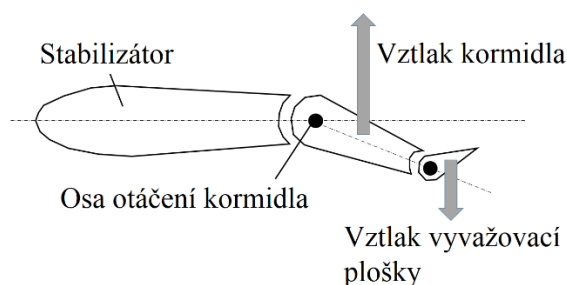


Obrázek 6-1 Rohové pasivní odlehčení. Princip vyvážení řídicích sil odlehčovací plochou kormidla. [10, s. 164]

## 6.2 Vyvažovací ploška (trimer)

Vyvažovací ploška je pohyblivá část letounu, která je zavěšena na odtokové části kormidla, přičemž osa jejího otáčení je rovnoběžná s osou otáčení kormidla. Vyvažovací ploška eliminuje závěsový moment přírůstkem aerodynamické síly, která působí opačným směrem než samotné kormidlo. Tato aerodynamická síla je sice menší než ta na kormidle, avšak působí na větším rameni vzhledem k ose otáčení kormidla. Díky tomu je vzniklý závěsový moment trimeru stejně velký, avšak opačného smyslu než závěsový moment samotného kormidla. Celková řídicí síla potřebná k vychýlení kormidla je pak rovna nule.

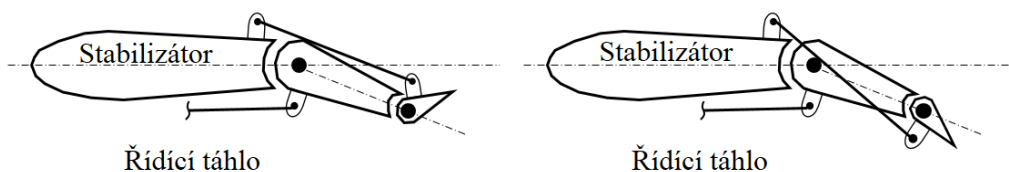
Výchylka vyvažovací plošky potřebná k eliminaci závěsového momentu závisí na skutečnostech, které se během reálného letu mění (např. rychlost). Kvůli tomu musí být vyvažovací ploška ovladatelná pilotem v závislosti na měnících se parametrech letu.



Obrázek 6-2 Princip funkce vyvažovací plošky. [10, s. 166]

## 6.3 Odlehčovací ploška (fletner) a přitěžovací ploška

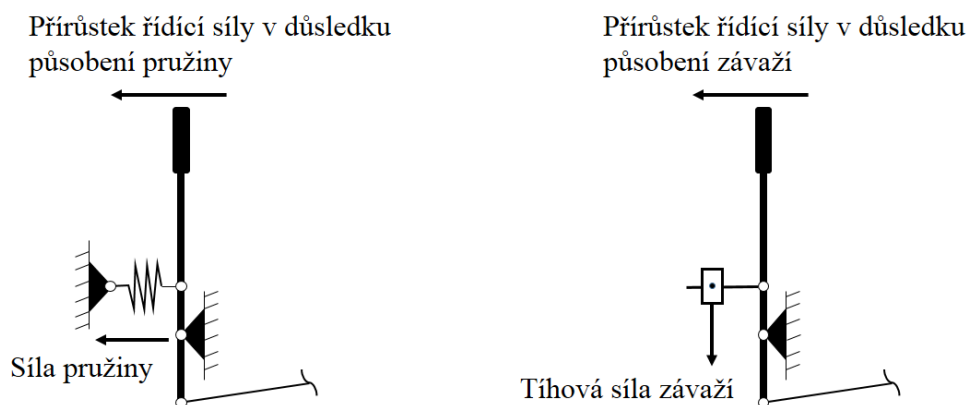
Oproti vyvažovací pracuje odlehčovací ploška nezávisle na pilotovi. Je také umístěna na odtokové hraně kormidla, avšak její výchylka je pevně dána v závislosti na vychýlce kormidla. Když přehlédneme tuto skutečnost, je princip funkce fletneru stejný jako u trimeru. Odlehčovací ploška je častější u malých letadel a výslednou řídicí sílu neeliminuje úplně, pouze zmenšuje. Pokud upravíme výchylku odlehčovací plošky tak, že závěsový moment naopak zvětšuje, mluvíme o přitěžovací plošce. Ta se používá naopak u letounů, které svými malými závěsovémi momenty neposkytují pilotovi dostatečný cit v řízení.



Obrázek 6-3 Princip funkce odlehčovací (vlevo) a přitěžovací plošky. [10, s. 168]

## 6.4 Pružina a závaží v řídicí soustavě

Mezi jiné než aerodynamické způsoby ovlivnění řídicích sil patří umístění pružiny nebo závaží do řídicí soustavy. Toto je typické pro lehčí letouny. Při překonávání závěsového momentu řídicí silou na řídidle může část této síly vyvodit pružina nebo závaží. Princip této funkce je uveden na obr. 6-4.



Obrázek 6-4 Princip ovlivnění řídicí síly účinkem pružiny a závaží. [10, s. 173]

## 6.5 Posilovače řízení

V případech, kdy jsou řídicí síly příliš velké na to, aby je pilot snadno přemohl, se do soustavy řízení letounu zavádí různé elektrické, pneumatické a hydraulické posilovače řízení, které pomohou pilotovi překonat závěsové momenty na kormidlech. Tyto posilovače jsou používány především u velkých dopravních letadel, kde jsou závěsové momenty velké v důsledku velkých rychlostí a velikostí řídicích ploch. V případě jejich použití pilotovi v překonání řídicí síly pouze napomáhají a pilot je stále nucen vynaložit úsilí k vyvinutí zbytku síly. Výhodou posilovačů je, že stále poskytují pilotovi alespoň část reálné zpětné vazby.

## 6.6 Nepřímá soustava řízení

Pokud je i zavedení posilovačů řízení nedostačující z hlediska překonání řídicích sil, používá se dnes soustav nepřímého řízení, kdy řídicí páky nejsou přímo propojeny s kormidly, ale ovládají pouze jednotku, která výchylky řídicích ploch vyhodnocuje a potřebné výchylky řídicích ploch upravuje pomocí servomotorů a hydraulických motorů. U moderních, především stíhacích vojenských letounů, jsou pak klasická řídicí páky (řídicí páka/řídicí volant) nahrazeny joystickem, který vyhodnocené elektronické signály posílá přímo k motorům, které ovládají výchylky kormidel (tzv. fly-by-wire systém). Zpětná vazba je pak pilotovi poskytnuta zprostředkovaně a uměle.

## 7 ZÁVĚR

Tato práce poskytuje ucelený přehled vývoje prostředků řízení letounu, který konstruktérovi a především studentovi technického oboru pomůže pochopit principy řízení letounů s důrazem na jejich vývoj napříč uplynulými více než dvěma staletími. Je zřejmé, že ihned po zvládnutí principů řízení a vyřešení problematiky ovladatelnosti letu vznikají stroje s čím dál většími požadavky na možnosti manévrovatelnosti. S ohledem na ně a na skutečnost vyšších požadovaných rychlostí bylo a stále je nutné navrhnout orgány řízení tak, aby splňovaly požadované aerodynamické parametry, díky kterým poskytnou pilotovi možnost přesného, předpokládaného a především bezpečného manévrování s co nejmenší možností přetížení letounu. Kormidla musí být sestrojena s ohledem na jejich dynamické namáhání v průběhu letu s požadavkem co nejmenší hmotnosti a dostatečné pevnosti.

Vhodnou kombinací řídicích ploch a správnou volbou jejich umístění na draku letounu dosáhneme požadované ovladatelnosti a obratnosti, vždy specifických pro konkrétní účel stroje. Návrh nového letounu, který zahrnuje také správnou volbu geometrie kormidel a jejich uspořádání, je zdlouhavá a náročná práce konstruktéra. Dnešní prostředky řízení jsou natolik dokonalé a sofistikované především díky válečným konfliktům 20. století, kdy nejširší škálu různorodých koncepcí řízení letounu sledujeme především ve vojenském průmyslu. Tlak na konstruktéry a designéry v těchto konfliktech s vidinou velkého ekonomického zisku poskytoval a vždy poskytovat bude dostatečnou motivaci k návrhu stále dokonalejších prostředků řízení.

Ovládání letounu kormidly poskytuje velkou škálu možných dosažitelných režimů letu, která však má své hranice. Ovládání letu vektorováním tahu v jisté míře tyto hranice posunuje dál a dává nové možnosti řízení letounu - je tak v posledních letech předmětem zájmu konstruktérů.

## POUŽITÉ ZKRATKY

VOP – vodorovné ocasní plochy

SOP – svislá ocasní plocha

VPP – vodorovné příďové plochy

SPP – svislá příďová plocha

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Letecká informační služba* [online] Praha: Řízení letového provozu ČR. ©2017 [cit. 2017-4-26]. Dostupné z: [lis.rlp.cz](http://lis.rlp.cz)
- [2] NICCOLI, Riccardo. *Historie letectví*. Dobřejovice: REBO, 2006. ISBN 80-7203-124-4.
- [3] LOWE, Malcolm V. *Svět letectví: Historie a současnost*. Dobřejovice: REBO, 2008. ISBN 978-80-255-0018-7.
- [4] SADRAEY, Mohammad H. *Aircraft Design: A systems engineering approach*. Chichester: John Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-95340-1.
- [5] LNĚNIČKA, Jaroslav. *Letecké modelářství a letectví*. Hradce Králové: Aeromodel, 1996.
- [6] GUDMUNDSSON, Snorri. *General aviation aircraft design: Applied methods and procedures*. Oxford: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-397308-5.
- [7] DINGLE, Lloyd a Michael H. TOOLEY. *Aircraft engineering principles*. 2. vyd. London: Routledge, 2013. ISBN 978-0-08-097084-4.
- [8] BALEJ, Jan, Pavel SVITÁK a Petr PLOCEK. *Historie letectví: Průkopníci světové aviatiky od antiky do r. 1914*. Brno: CPress, 2012. ISBN 978-80-264-0041-7.
- [9] MERTL, Vlastimil. *Konstrukce a projektování letadel*. Brno: PC-DIR Real, 2000. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1789-7.
- [10] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu II: Letové vlastnosti*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-761-1.
- [11] History of Flight and The Mongolfier Brothers. *HubPages* [online]. ©2017 [cit. 2017-4-26]. Dostupné z: <https://hubpages.com/technology/History-of-Flight>
- [12] *Wright brothers aeroplane co.* [online]. West Milton: Wright Brothers Aeroplane Company. ©1999-2010 [cit. 2017-4-26]. Dostupné z: <http://www.wright-brothers.org/>
- [13] GRAY, F. Carroll. *Flying machines* [online]. ©1998-2015, posl. rev. 2015-7-9 [cit. 2017-4-26]. Dostupné z: <http://www.flyingmachines.org/>
- [14] McCUTCHEON, K. Paul a William E. BAXTER. Taking to the Skies. *Smithsonian Libraries* [online]. Smithsonian Institution Libraries. Publ. 2003-12 [cit. 2014-4-26]. Dostupné z: <http://www.sil.si.edu/ondisplay/flight/intro.htm>
- [15] GRAY, Carroll. *Pioneer aeroplanes – 1908 to 1915* [online]. ©1998-2006, posl. rev. 2010-29-7 [cit. 2017-4-26]. Dostupné z: <http://www.pioneeraeroplanes.com/>
- [16] *ClipartFest: A digital octopus webside* [online]. Los Angeles, ©2016 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://clipartfest.com/>
- [17] *Californiasciencecenter* [online]. Los Angeles: California Science Center, 2015 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://californiasciencecenter.org/>